

고유모형 지지격자의 기계적 성능평가 시험

Mechanical Performance Evaluation Test of Peculiar Spacer Grid

윤경호, 강홍석, 김형규, 송기남, 정연호

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

종래의 연료봉지지 개념과는 다른 새로운 개념을 갖도록 고안한 3종의 지지격자 시편에 대해 기계/구조적 성능시험 - 스프링과 딴플의 특성시험 및 정적 좌굴시험 - 을 수행하였다. 시험조건은 가능한 한 지지격자가 처해진 경계조건을 준용하도록 했으며, 시편의 수를 외국의 다른 선도업체들이 행하는 것보다 많게 하였다. 시험결과를 분석한 결과 이들 지지격자 시편은 종래 개념을 적용한 KOFA형 지지격자 스프링보다 강성도가 크어도 소성변형량은 작거나 비슷하였다. 정적 좌굴강도는 이들 시편들과의 직접적인 비교 대상이 없어 상대적인 비교만을 행하였으며, 그 결과 H형 격자체가 다른 2종의 시편에 비해 컸다.

Abstract

The spring and dimple characteristic test and the static buckling strength test were conducted with 3 kinds of specimen which were developed with new concept of fuel rod supporting. The applied conditions of the tests were adjusted to the actual boundary condition, the number of specimens was chosen to be more than the conventional tests carried out by foreign fuel vendors. As a result of the tests, the plastic deformation of the new springs were much smaller than or similar to that of the conventional springs of KOFA even though the specimen had the larger stiffness. The static buckling strength was compared among the test specimen because there were no comparable data of the conventional spacer grid. As a result of the buckling test, the effective area

of H-type unit cell is the largest. Therefore, H-type grid had the largest critical buckling strength than the others, i.e., double grid and swirl grid.

1. 서론

경수로용 핵연료집합체에서 지지격자는 연료봉들이 횡방향 및 종방향의 정위치에 유지하도록 하여 연료봉간의 수로가 보장되도록 하며, 또한 핵연료집합체에 임의의 방향으로 가해지는 외부하중으로부터 연료봉들을 보호하는 핵심 구조부품이다. 본 고유모형 지지격자는 지지부위에서 연료봉을 효과적으로 지지하게 하여 프레팅 마모를 억제시킬 수 있으며, 또한 연료봉에서 발생된 열을 냉각수로 효과적으로 전달시킬 수 있도록 고안하였다. 개발한 3가지 형상의 지지격자에 대한 기계/구조적 성능을 비교 평가하고 이를 토대로 기계/구조적으로 성능이 더욱 향상된 고유의 지지격자 모델을 정립하고자 이들 지지격자 시편들에 대한 기계/구조적 특성시험 - 스프링 및 덤플의 특성시험과 격자체의 정적 좌굴시험 - 을 수행하였다. 시험조건은 지지격자가 처해진 경계조건을 준용하도록 했으며, 고유 모형의 지지격자에 대하여 최초로 시험을 수행하는 것을 고려하여 시편의 수를 외국의 다른 선도업체들이 행하는 것보다 많게 하였다.

본 논문에서는 고안된 3가지 모형의 지지격자 - 이중판 노즐형 냉각재 혼합 지지격자[1], 회전유동 발생장치를 가진 핵연료집합체 지지격자[2], 프레팅 마모 억제를 위한 H형 지지격자체[3] - 들의 기계/구조적 성능을 상호 비교하기 위하여 각 지지격자 형상의 단일 격자판에 대하여 수행한 스프링 및 덤플의 특성시험 결과와 3×3형 격자체에 대하여 수행한 정적 좌굴시험 결과들을 비교 분석하였다.

2. 지지격자 모형

(1) 이중판 노즐형 냉각재 혼합 지지격자(이하 냉각재 혼합 지지격자; Double Grid)

Fig. 1(a)는 이중(two fold)의 박판(thin plate)을 중첩시키고 중첩된 판 사이의 일정 부분에 냉각재 통로를 형성시키며 냉각재 통로의 형태로 타원형 또는 사각형의 형상을 채택하고, 길이방향으로는 Y자 혹은 역 Y자의 형태가 되도록 하여 핵연료 집합체의 온도가 낮은 영역과 높은 영역의 냉각재를 혼합하여 열효율을 증가시키도록 되어 있는 지지격자이다. 이는 핵연료집합체의 수로내에서 냉각재를 교차로 혼

합하여 연료봉으로부터 냉각재로의 열전달을 증가시킴으로써 핵연료봉의 국부적인 과열을 방지하고, 핵연료봉과 지지격자간의 접촉을 선접촉 혹은 면접촉이 되도록 하여 연료봉과의 프레팅 마모 발생 가능성을 저하시키며, 지지격자 자체의 횡방향 충격 강성도를 저하시키지 않도록 하여 핵연료집합체의 건전성이 향상되도록 고안한 것이다.

(2) 회전유동 발생장치를 가진 지지격자(이하 회전유동 지지격자; Swirl Grid)

Fig. 1(b)는 핵연료봉을 지지하기 위하여 가로와 세로로 배열되는 복수의 격자판을 조립에 의해 구성하는 지지격자에 대한 것으로서 조립된 격자판의 상단 교차지점에 형성된 4개의 바람개비 형태로 절곡된 날개는 강력한 회전유동 발생장치에 의해 핵연료의 냉각 효율을 향상시키고, 상기 격자판의 측면 중앙에 위치하며 유동 중에서는 수력적 항력을 이용할 수 있는 형상을 가진 스프링은 기계적 스프링력 외에 수력적 항력에 의한 스프링력도 함께 작동하여 노심 내에서 장기간 중성자 조사에 의한 초기 기계적 스프링력 이완을 보완할 수 있으며, 또한 상기 격자판과 연료봉의 접촉 부분이 등각의 접촉이 되도록 되어 있어 연료봉의 진동 억제력 및 마모에 대한 저항력이 향상되도록 고안한 것이다.

(3) 프레팅 마모 억제를 위한 H형 지지격자(이하 H형 지지격자; H-type Grid)

Fig. 1(c)는 연료봉과 지지격자 스프링 및 덤플간의 접촉을 종래의 점접촉이나 선접촉이 아닌 면접촉(conformal contact)이 되도록 함으로써 접촉부위에서 첨두응력(peak stress)의 크기를 감소시키고 유체유발 진동에 의해 연료봉이 축방향 및 횡방향으로 미소한 흔들림으로 인한 연료봉과 지지부들간의 상대운동을 감소시켜 연료봉의 프레팅 마모 발생 가능성을 억제하기 위한 것이며, 스프링 지지점에서의 반력(reaction force)을 분산시킬 수 있는 형상을 갖도록 하여 안정적인 연료봉의 지지를 기하고 스프링의 탄성 거동 허용범위를 확장시켜 원자로 운전중 변화하는 지지조건에서도 핵연료집합체의 수명기간 동안 건전한 연료봉의 지지가 가능하도록 고안한 것이다.

3. 기계적 성능평가 시험

(1) 지지격자 스프링 및 덤플의 특성시험

스프링 및 덤플의 특성시험을 위한 장치의 개략도가 Fig. 2에 나타나 있다. 스프링 및 덤플은 격자판 상태에서의 경계조건을 준용하였다. 스프링에 가해지는 하중은 연료봉이 접촉하여 가해지기 때문에 연료봉과 같은 원통 형상의 치구를 제작하여 사용하였다. 하중은 압전소자(piezoelectric crystal)에 의해 측정되며, 변위의 측정을 위해서는 변위 변환기(displacement transducer)를 사용하였다. 증폭된 측정신호는 디지털로 저장되어 x-y 선도로 그려진다.

(2) 격자체의 정적 좌굴시험

격자체의 정적 좌굴시험을 위한 장치의 개략도가 Fig. 3에 나타나 있다. 각 종류별 6개의 3×3형 격자체를 치구 위에 올려놓고 상부와 하부의 그립(grip)을 이 격자체와 접촉시킨 후 하부 그립을 상승시켜 압축하중이 작용하도록 하였다. 이 하중은 스프링 및 덤플의 특성시험과 마찬가지로 압전소자(piezoelectric crystal)에 의해 측정되며, 변위의 측정을 위해서는 변위 변환기(displacement transducer)를 사용하였다. 증폭된 측정신호는 디지털로 저장되어 x-y 선도로 그려진다.

4. 결과 및 고찰

(1) 지지격자 스프링 및 덤플의 특성시험 결과

냉각재 혼합 지지격자의 스프링 역할을 하는 지지부에 대한 특성시험 결과 스프링의 탄성 강성도는 상한치가 402.4 N/mm, 하한치가 395.9 N/mm로 나타났으며, 최대 변위까지 하중을 가한 결과 최종 소성변형량이 0.2 에서 0.25 mm로 나타났다. 냉각재 혼합 지지격자 스프링은 종래 개념의 스프링에 비해 탄성 강성도가 큼에도 소성변형량은 작은 것으로 나타났다. 이 시편의 재질은 스테인레스강으로 재료의 탄성계수는 KOFA형 스프링의 재질인 인코넬과 거의 같으나 항복강도가 인코넬의 약 1/3임에도 소성변형량이 작은 것은 스프링의 성형시 곡률의 변화가 적어 스프링 내에 가공경화에 의한 잔류응력이 작기 때문으로 생각된다. 소성 변형량이 작은 것은 연료봉의 지지거동 측면에서는 노내에서 스프링의 잔류변위를 크게 할 수 있어 종래 스프링에 비해 더욱 오랜 기간 건전한 연료봉의 지지를 유지할 수 있을 것으로 생각된다[4].

회전유동 지지격자 스프링에 대한 특성시험 결과 스프링의 탄성 강성도는 상한치가 164.4 N/mm, 하한치가 152.9 N/mm로 나타났으며, 최대 변위까지 하중을 가한

결과 최종 소성 변형량이 0.45 mm로 나타났다. 회전유동 지지격자의 경우, 소성 변형량이 큰 것은 재료의 물성, 즉 스테인레스강의 항복강도가 인코넬에 비해 낮으며, 외팔보의 기하학적 특성 때문으로 보인다. 그리고 스프링의 탄성 강성도는 스프링 재료의 탄성계수와 관성모멘트에 의존하게 되는데 탄성계수는 인코넬과 거의 같으므로 관성모멘트(즉 스프링의 두께 및 폭)가 KOFA형 스프링에 비해 큰 때문으로 판단된다.

H형 지지격자의 스프링 및 덤플에 대한 특성시험 결과 스프링 강성도는 상한치가 371.1 N/mm, 하한치가 361.8 N/mm로 나타났으며, 최종 소성변형량은 0.15 에서 0.20 mm로 나타났다. H형 지지격자 스프링의 경우, 시편 재료의 항복강도가 인코넬의 1/2임에도 소성변형량이 작은 것은 냉각재 혼합 지지격자 스프링과 같은 이유 때문으로 생각된다.

Fig. 4는 새로 고안된 3가지 지지격자 스프링에 대한 하중-변위 선도로 이들에 대한 상호 비교를 나타내고 있다. Fig. 5는 새로 고안된 2가지 지지격자 덤플에 대한 하중-변위 선도로 약 8800 N/mm의 탄성 강성도를 나타내었다.

이러한 특성은 연료봉 지지에 대한 건전한 측면이 있는 반면, 종래 스프링에 비해 상당히 큰 탄성 강성도는 연료봉의 삽입시 연료봉의 표면에 흠을 유발할 수 있으며, 또한 연료봉의 노내 조사로 인한 연료봉의 길이방향 성장을 억제하여 붐을 발생시킬 우려가 높다. 따라서 스프링의 탄성 강성도를 작게 할 필요가 있는 것으로 판단된다. 냉각재 혼합 지지격자 스프링의 강성도를 줄일 수 있는 방법은 현재 사각판의 형상에 지지격자 높이를 기준으로 종방향 혹은 횡방향의 슬롯을 형성시키는 방법, 냉각재 혼합 유동 단면을 크게 함으로써 지지부의 높이를 줄이거나 지지부와 냉각재 유동 단면의 형상을 직각의 형상이 아닌 아아치 형상으로 함으로써 유연한 스프링 거동을 갖도록 하는 방법 등이 가능할 것으로 생각된다. 회전유동 지지격자의 경우, 스프링의 일부를 절단(cut-out)하거나 지지부로부터 돌출되는 스프링의 각도를 수정하는 방법 등이 가능할 것으로 생각된다. H형 지지격자의 경우, 스프링의 길이를 늘이거나, 스프링 단면의 관성모멘트를 작게 하는 방법, 즉 스프링 단면의 폭과 두께를 작게 하는 방법 등이 있을 것이다.

(2) 격자체의 정적 좌굴시험 결과

냉각재 혼합 격자체의 정적 좌굴시험에 대한 결과 평균 좌굴 강성도는 6900

N/mm, 평균 임계 좌굴강도는 2587 N 이었다. 또한 좌굴모드는 가장 우세한 일차 모드로 좌굴이 일어나는 것을 알 수 있었다.

회전유동 격자체는 냉각재 혼합 격자체보다는 좌굴에 대한 저항성이 크며, 평균 좌굴 강성도는 23300 N/mm, 평균 임계 좌굴강도는 4002 N이었고, 좌굴모드는 냉각재 혼합 격자체와 동일하였다.

H형 격자체의 정적 좌굴시험에 대한 결과 평균 좌굴 강성도는 20600 N/mm, 평균 임계 좌굴강도는 4402 N 이었고, 좌굴모드는 다른 2종의 격자체 시편과 동일한 것으로 나타났다.

이들 3종의 격자체 시편에 대한 정적 좌굴강성도와 임계 좌굴강도를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 7은 3가지 격자체에 대한 좌굴시험후 시편의 형상을 나타낸 것으로 좌굴이 모두 일차모드로 발생함을 알 수 있었다.

한편 격자체의 정적 좌굴강도는 종래의 격자체와는 직접적인 비교 대상이 없어 3가지 시편에 대한 상호 비교만을 행하였다. 그 결과 H형 격자체가 다른 2종의 시편에 비해 상대적으로 좌굴에 대한 저항성이 큰 것으로 나타났다. 왜냐하면, H형 격자체는 하중에 대해 저항하는 단일 셀의 절개(cut-out)면적이 다른 시편들보다 작기 때문인 것으로 판단된다. 냉각재 혼합 격자체는 비록 0.3 mm의 판을 이중으로 중첩시켜 격자체를 형성하였지만 좌굴에 대한 저항은 단일 판이 감당하므로 좌굴에 대한 저항성은 상대적으로 작았으며, 회전유동 격자체의 경우 회전날개가 좌굴에 대한 저항성을 향상시키지는 않는 것으로 나타났다.

5. 결론

고안된 3가지 지지격자 모형에 대한 기계/구조적 성능시험을 수행하고 그 결과들을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 이들 후보 모델들은 종래의 지지격자 스프링에 비해 소성변형의 개시 시점은 비슷하였고, 최종 소성변형량은 KOFA형 지지격자 스프링에 비하여 작거나 비슷하였다. 또한 종래의 KOFA형 지지격자 스프링보다는 그 강성도가 상당히 큼에도 불구하고 탄성영역이 더 넓어 연료봉의 노내 지지시 잔류 탄성변위를 크게 할 수 있다. 따라서 연료봉의 지지거동에 대한 건전성이 향상될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 격자체의 정적 좌굴시험 결과 박판을 이중으로 중첩시켜 격자체를 구성하는 것보다는 단일 판의 두께가 큰 것이 좌굴에 대한 저항성이 큰 것으로 나타났으며, 격자판의 좌굴에 대해 단일셀의 유효 면적이

넓을수록 임계 좌굴강도는 커지는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. 강홍석, 윤경호 외 7인, “원자로의 핵연료집합체 이중관 노즐형 냉각재 혼합지지격자,” 특허출원 제97-68258호, 1997.
2. 전태현, 윤경호 외 7인, “회전유동 발생장치를 가진 핵연료집합체 지지격자,” 특허출원 제98-3133호, 1998.
3. 윤경호 외 7인, “프레팅 마모 억제를 위한 H형 스프링이 부착된 지지격자체,” 특허출원 제97-71799호, 1997.
4. K.T. Kim, K.H. Yoon et al., J. of Korean Nuclear Society, Vol. 28, No. 1, pp 17-26, 1996.

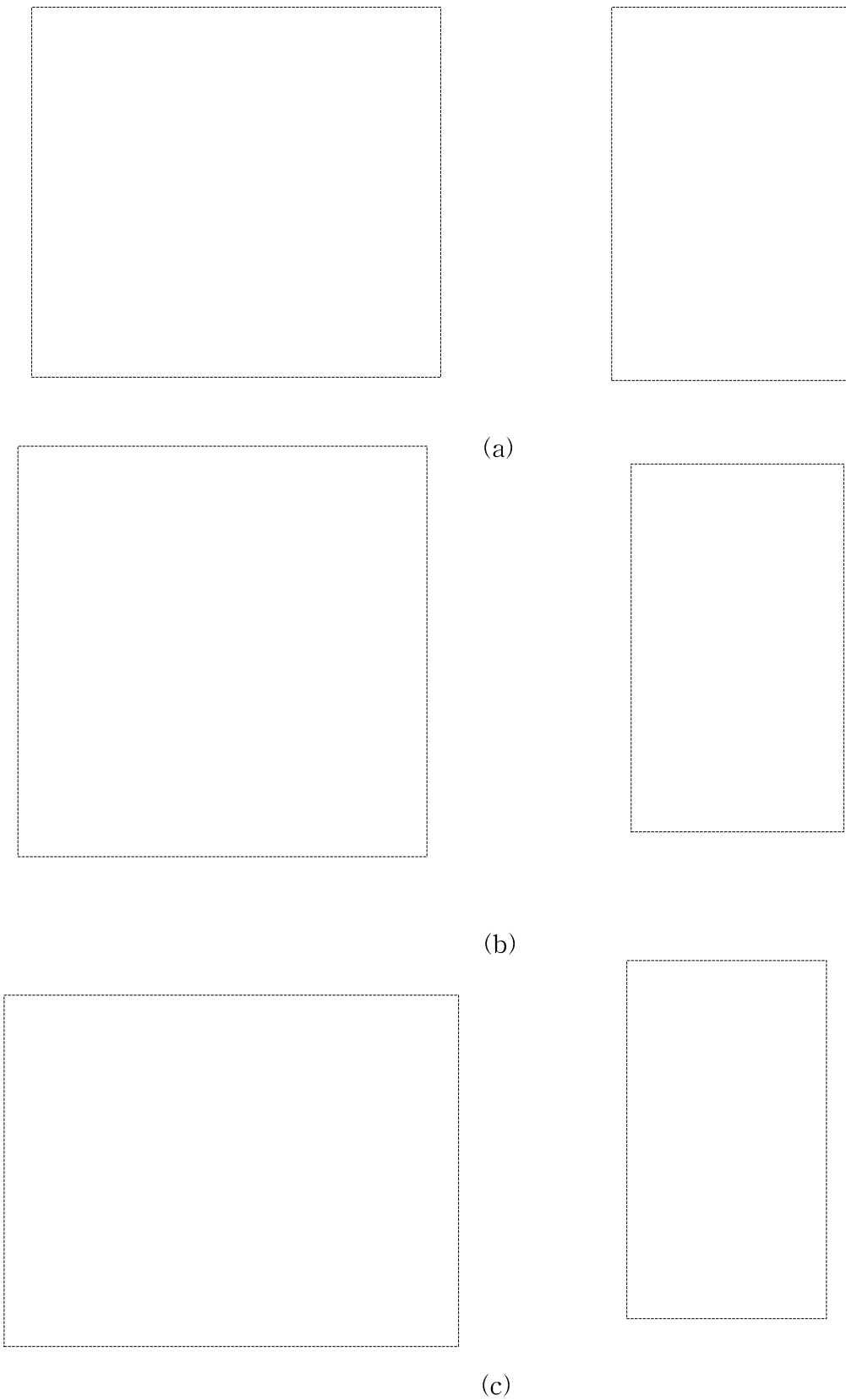


Fig. 1. Schematic Drawing of 3 kinds of Developed Specimens: (a) Double Grid; (b) Swirl Grid; (c) H-type Grid.



Fig. 2. Test Equip. Setup for Charac. Test of Spring and Dimple.



Fig. 3. Test Equipment Setup for Static Buckling Test of Spacer Grid.

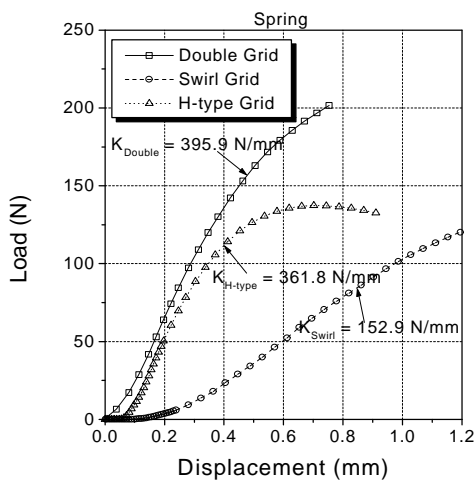


Fig. 4. Characteristic Curve of Springs for Developed Spacer Grids.

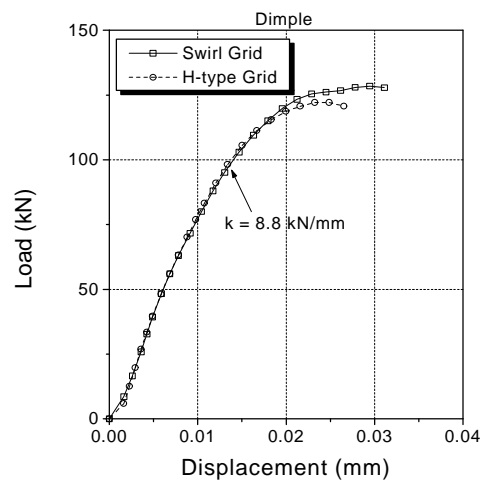


Fig. 5. Characteristic Curve of Dimples for Developed Spacer Grids.

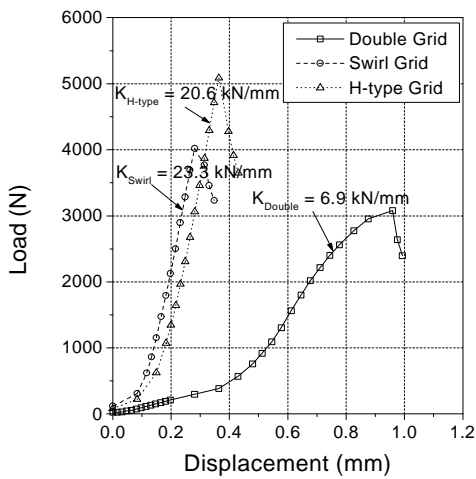


Fig. 6. Static Buckling Strength of Developed Spacer Grids.

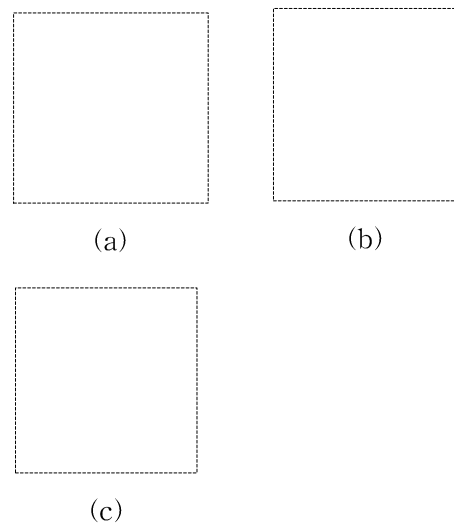


Fig. 7. Buckling Modes of Developed Spacer Grids: (a) Double Grid; (b) Swirl

Grid: (c) H-type Grid.